

城市浅水型湖泊底泥释磷的通量估算——以南京玄武湖为例*

龚春生¹, 姚琪¹, 范成新², 董浩平¹, 郑超海¹, 包先明²

(1: 河海大学环境科学与环境工程学院, 南京 210098)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要:以南京玄武湖为研究对象,通过静态条件下5℃、10℃、15℃、25℃、35℃玄武湖底泥释磷室内实验计算玄武湖释磷速率,得出底泥释磷速率与上覆水温度的关系,进而算出玄武湖北湖每年磷释放量为0.815 t,东南湖每年磷释放量为1.013 t,西南湖每年磷释放量为0.266 t. 玄武湖每年底泥释磷总量为2.094 t. 根据费克定律,建立了间隙水扩散模型,利用模型计算玄武湖北湖每年磷释放量为0.799 t,东南湖每年磷释放量为0.983 t,西南湖每年磷释放量为0.232 t. 玄武湖每年底泥释磷总量为2.014 t. 在不考虑外源污染的情况下,由底泥磷释放造成的内源污染使玄武湖磷浓度年均维持在0.101 mg/L,超过湖泊富营养化磷标准,因此,在切断外源污染的情况下应采取治理磷的内源污染.

关键词:城市湖泊; 释磷; 间隙水; Fick 定律; 玄武湖; 富营养化

Release fluxes estimate of phosphorus in a urban shallow lake: Lake Xuanwu, Nanjing

GONG Chunsheng¹, YAO Qi¹, FANG Chenxin², DONG Haoping¹, ZHENG Chaohai¹ & BAO Xianming²

(1: Environmental Science and Technology Department, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: The physical and chemical characteristics of the surface sediment of Lake Xuanwu, Nanjing were investigated in April-September, 2004 and April-July, 2005. After simulating the phosphorus release in laboratory from the surface sediments samples under static conditions under 5, 10, 15, 25, 35°C, respectively, the release fluxes of phosphorus across the water-sediment interface in different sub-lakes of Lake Xuanwu were calculated, i. e. 0.815 t/a, 1.013 t/a and 0.266 t/a for northern, southeastern and southwestern sub-lakes, separately. The total release flux for Lake Xuanwu could be 2.094 t/a. Based on the Fick's Law, a pore water dispersion model was build up, and the phosphorus release for the whole Lake Xuanwu could be calculated as 2.014 t/a to the water, with 0.799 t/a, 0.983 t/a and 0.232 t/a for northern, southeastern and southwestern sub-lakes. Such a net release from lake sediment for phosphorus makes an appropriate 0.101 mg/L in lake water-a value exceeding threshold for lake eutrophication-on the year run when excluding the diffusion pollution to the lake. As a result, additional measures should be taken to reduce internal phosphorus pollution even when external pollutants are under control.

Keywords: Urban lakes; phosphorus release; pore water; Fick's Law; Lake Xuanwu

近年来随着国民经济的发展,湖泊底泥遭受程度不同的污染,对水体来说,沉积物犹如一个营养贮存库,在一定环境条件下,底泥间隙水中营养盐(如N, P,等)通过扩散、对流、沉积物再悬浮等过程向水体释放营养物,因此,湖泊水体富营养化程度与底泥营养物释放有较为密切的联系. 研究表明^[1]:作为内源,在外源逐步得到控制的情况下,沉积物对上覆水释放的氮、磷将成为湖泊富营养化的重要来源. 长江中下游地区是中国湖泊最为集中、人类活动与湖泊关系最为密切的地区,大于1 km² 小于100 km² 的湖泊有633个^[2],其中主要为浅水湖泊,与深水湖泊相比,浅水湖泊单位水体具有更大的泥-水接触面积,泥-水界面能进行强烈和频繁的营养物质交换. 有数据显示,当湖泊的氮磷比(N/P)大于7时,磷是湖泊富营养化的

* 论文资助来源:国家自然科学基金重点资助项目(50239030)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-348) 2004-12-06 收稿;2005-08-17 收修改稿. 龚春生,男,1974 生,博士研究生 E-mail: gongchunsheng@163.com

限制性营养元素^[3]. 因此, 研究浅水型湖泊底泥释磷通量具有重要的环境意义. 为此, 我们选取具有典型代表性的城市小型浅水湖泊——南京玄武湖, 通过静态条件下不同温度底泥释磷室内实验和间隙水扩散模型研究玄武湖底泥释磷通量, 从而为玄武湖治污方案的实施提供科学依据.

1 玄武湖底泥化学和物理特征

玄武湖位于南京老城区东北部, 由北湖、东南湖及西南湖三块组成, 10.0 m 水位时平均水深 1.2 m 左右, 湖面面积 3.71 km², 其中北湖 1.44 km²、东南湖 1.78 km²、西南湖 0.49 km². 根据湖底底泥分布, 在北湖区 1[#] (32°04′52.9″N, 118°46′55.9″E)、东南湖区 2[#] (32°04′28.8″N, 118°47′32.3″E)、3[#] (32°04′14.8″N, 118°47′56.7″E)、西南湖区 4[#] (32°04′08.0″N, 118°47′32.3″E). 于 2004 年 4 月 - 9 月和 2005 年 4 月 - 7 月采用 $\varphi 62 \times 1000$ mm 有机玻璃管进行底泥柱状样采集, 垂直取样深度在 25 cm 以上, 每采样点均同步采集表层水样以进行底泥理化分析与底泥释磷实验. 用作理化分析的样品采集后立即现场切割分层 (每 2 cm 取一层样), 包装并测定 pH 和 Eh, 之后将底泥带回实验室置于阴暗处风干, 按四分法采样研磨并过 100 目筛以进行理化分析. 磷的形态按照第二版《湖泊营养化调查规范》(金相灿主编) 分级提取, 重金属采用 PRODIGY HIGH DISPERSION ICP 进行测定. 玄武湖沉积物颗粒组成以粉砂粒级与粘粒级为主, 占 64% - 98%, 属粘壤土质淤泥. 沉积物样品的粘土矿物中, 以伊利石/蒙脱石混层为主, 其次是高岭石和绿泥石. 各测点底泥

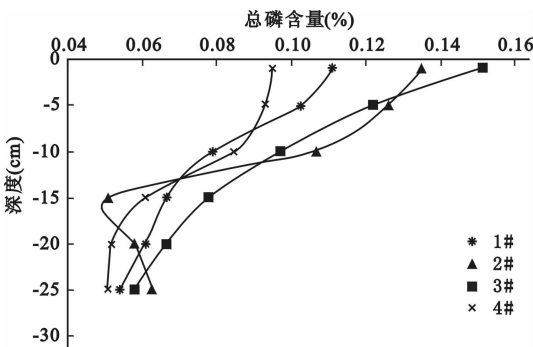


图 1 玄武湖底泥磷的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of phosphorus content in the sediment of Lake Xuanwu

含水率在 50% - 80% 之间, 孔隙率: 60% - 85%, pH 值: 7.56 - 8.76, Eh: -216 - 168, 阳离子交换量: 0.20 - 0.25 mmol/g, 有机质: 7.47 - 13.97, TN: 2.5 - 3.7 mg/g. 玄武湖沉积物化学组成见表 1. 对各测点底泥中磷的形态分析结果表明: 玄武湖底泥无机磷的含量最高, 占总磷的 74%. 在无机磷中闭蓄态的磷酸铁盐占总磷的 42%, 钙结合态磷 (Ca - P) 占总磷的 20%, 还原态可溶性磷酸盐占总磷的 9%, 有机磷占总磷的 26%, 其他形态的磷含量则很少. 采样点总磷的垂直分布如图 1 所示. 由图上可以看出, 表层底泥磷含量平面分布差异明显, 总磷含量的垂直变化各不相同, 多显示出近表层含量变化较大、下层差异较小的特点. 自 15 cm 处向表层, 总磷含量多表现出明显的增加趋势, 但大于 15 cm 后这种趋势已不明显, 维持在 0.055% 左右.

表 1 玄武湖表层沉积物化学组成

Tab. 1 Chemical contents of the surface sediments of Lake Xuanwu

元素含量 (占灼烧重%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
玄武湖沉积物	67.66	15.65	6.5	2.19	1.74	0.77	0.14	2.20	1.25	0.47

2 底泥释磷通量计算

2.1 静态条件下不同温度底泥释磷通量

用于温度控制条件下磷释放模拟实验的底泥样品柱状取样后保留于有机玻璃管中, 下端用橡皮塞塞紧, 垂直放置在设定温度的循环水浴恒温器 (Colora WK100, $\pm 0.1^\circ\text{C}$) 中, 蔽光培养. 上层水均取原样点 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤水样, 每管 2000 ml, 每次取样 100 ml, 取样后补充原样点水样至 2000 ml 刻度. 对水样和间隙水样 (4000 转/min 底泥离心 30 min) TP 采用过硫酸钾消解法^[4] 测定释放条件 pH、溶解氧、微生物与

原水样同. 对各测点柱状底泥在 5℃、10℃、15℃、25℃、35℃ 水域进行磷释放实验(图 2). 由图 2 可见, 在 35℃ 时, 开始磷释放速度很快, 突发性达一最高值(0.158 mg/L), 然后趋于平缓下降趋势; 在 25℃ 时, 开始磷释放速度较快, 然后处于平缓上升趋势; 而在 15℃、10℃、5℃ 时, 磷释放一直处于缓慢的上升阶段, 这说明温度升高会增加底泥磷的释放. 用下式计算磷释放速率^[4]:

$$S_{ij} = \left| V(C_n - C_0) + \sum_{j=1}^n (C_{j-1} - C_a) \right| / (A \cdot T) \quad (1)$$

其中, V 为实验柱中上覆水体积(L); C_n 、 C_0 、 C_{j-1} 为第 n 次、初始和 $j-1$ 次采样时磷浓度(mg/L); C_a 为添加水样中的磷浓度(mg/L); V_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样体积(L); A 为柱样中水—底泥接触面积(m^2); T 为释放时间(d). 结果如表 2 所示. 根据表 2 底泥释磷速率与上覆水温度的关系, 可以用指数方程表示两者之间的相关关系.

$$S_{ij} = \delta \cdot e^{\lambda T} \quad (2)$$

表 2 实验结果计算的玄武湖释磷速率

Tab. 2 The rate of DTP release of Lake Xuanwu on the basis of the experimental results

实验温度(℃)	释放速率(t)			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
5	0.22	0.23	0.21	0.19
10	0.42	0.43	0.41	0.39
15	0.89	0.96	0.85	0.81
25	2.97	3.06	2.91	2.87
35	10.08	10.21	9.99	9.92

其中 δ 、 λ 为常数. 令 $\ln S_{ij} = Y$, $\ln \delta = \varepsilon$, 则(1)式就可以用一元线性方程表示

$$Y = \varepsilon + \lambda T \quad (3)$$

对表 2 中数据用(3)式进行线性回归分析, 由此得北湖 1[#]测点底泥释磷速率与上覆水温度的关系为 $S_{ij} = 0.121e^{0.1277T}$, 东南湖 2[#]为 $S_{ij} = 0.128e^{0.1267T}$, 3[#]为 $S_{ij} = 0.115e^{0.1287T}$, 西南湖 4[#]为 $S_{ij} = 0.105e^{0.1317T}$. 由此可算出任一温度下北湖、东南湖、西南湖的底泥释磷速率. 根据气象统计, 5℃、10℃、15℃、25℃、35℃ 代表的时间段分别为 0.15 年、0.25 年、0.35 年、0.20 年、0.05 年, 由于各湖区底质的不同, 北湖、东南湖及西湖沉积物的磷释放分别计算, 全湖磷释放总量可用下式计算^[8]:

$$W = \sum_i^n \sum_j^t S_{ij} A_i \Delta T_j \quad (4)$$

式中: W 为全湖磷释放总量(t/a), A_i 表示第 i 个湖区面积(m^2), ΔT 表示实验温度所代表的时间段(a). 按室内实验结果计算的玄武湖磷释放量如表 3 所示.

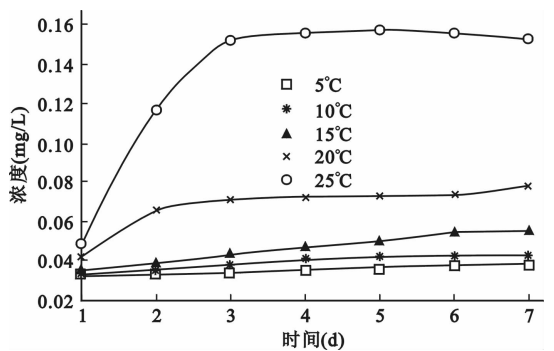


图 2 不同温度下 3[#]沉积物 TDP 释放
Fig. 2 TDP release from the sediment of No. 3 in different temperatures

表3 实验结果计算的玄武湖磷释放量(t)

Tab.3 The amount of DTP release of Lake Xuanwu on the basis of the experimental results

实验温度(°C)	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
5	0.017	0.011	0.011	0.005
10	0.056	0.035	0.034	0.018
15	0.164	0.109	0.097	0.051
25	0.313	0.199	0.189	0.103
35	0.265	0.166	0.162	0.089

由表可以算出北湖年磷释放量为 0.815 t, 东南湖年磷释放量为 1.013 t, 西南湖年磷释放量为 0.266 t. 5°C 时全湖年磷释放量为 0.044 t, 10°C 时全湖年磷释放量为 0.143 t, 15°C 时全湖年磷释放量为 0.421 t, 25°C 时全湖年磷释放量为 0.804 t, 35°C 时全湖年磷释放量为 0.682 t, 全湖年磷释放总量为 2.094 t.

2.2 间隙水扩散模型的建立及底泥释磷通量计算

间隙水中溶解物的扩散和污染物颗粒的沉积都会产生污染物从底泥中释放, 由于瞬时间隙水对流及底泥下沉速度较小, 因此底泥向水体瞬时释磷可看作间隙水中总磷向上覆水扩散过程, 设表层底泥间隙水总磷的浓度为 C_p , 泥-水界面水中总磷的浓度为 C_0 , t 时刻为 C , 以泥-水界面为坐标轴原点 ($z=0$) 向上无限远处 (水相) 为 $z = \infty$, 根据 Fick 扩散定律可得方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (5)$$

边界条件为: (1) 当 $t = 0, z > 0$ 时, $C = C_0$; (2) 当 $t > 0$ 时 $z = 0, C = C_p; z = \infty, C = C_0$. 用拉普拉斯变换求解方程得:

$$\frac{C - C_0}{C_p - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{Dt}} \quad (6)$$

其中误差函数

$$\operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{Dt}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\xi^2} d\xi \quad (7)$$

利用(6)、(7)两式可求得:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} = - \frac{C_p - C_0}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (8)$$

因此可得瞬时扩散通量:

$$F = - \varphi D \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} = \varphi (C_p - C_0) \sqrt{\frac{D}{t\pi}} \quad (9)$$

其中 φ 是表层底泥空隙度, D 是间隙水溶液扩散系数, 对于扩散系数, 目前报道的值^[9] 为 $10^{-5} - 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, 考虑到风浪、底栖生物的扰动往会对底泥起搅动作用, 从而有利于扩散, 本文取值为 $9.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$. 因此在较短时间 t 内, 底泥释磷通量为

$$F = \frac{1}{t} \int_0^t \varphi (C_p - C_0) \sqrt{\frac{D}{t\pi}} dt = 2\varphi (C_p - C_0) \sqrt{\frac{D}{t\pi}} \quad (10)$$

上式表明底泥释磷通量仅与空隙度、扩散系数以及泥-水界面间浓度梯度有关. 按式(10)计算的底泥释磷通量如表4所示.

表 4 扩散 - 对流模型计算的玄武湖磷释放量

Tab. 4 The amount of DTP release of Lake Xuanwu on the basis of the pore water dispersion model

测点	孔隙率 (%)	间隙水浓度 (mg/L)	上覆水浓度 (mg/L)	扩散通量 (mg/(m ² ·d))	年释放量 (t)
1 [#]	72.36	0.213	0.149	1.521	0.799
2 [#]	81.76	0.202	0.143	1.584	0.515
3 [#]	84.42	0.215	0.163	1.442	0.468
4 [#]	80.56	0.194	0.145	1.296	0.232

由表 4 可以算出北湖年磷释放量为 0.799 t,东南湖年磷释放量为 0.983 t,西南湖年磷释放量为 0.232 t,全湖年磷释放总量为 2.014 t. 综合表 3、表 4 计算结果,用扩散模型计算的玄武湖磷释放量与室内实验模拟结果较为一致,两者平均值为 2.054 t/a. 玄武湖容积为 $4.464 \times 10^6 \text{ m}^3$,湖面降水量为 $3.421 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,地表径流为 $12.09 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,在不考虑外源污染及将入湖水量看成“纯净水”的情况下,由底泥磷释放造成的内源污染使磷浓度年均维持在 0.101 mg/L,超过 0.02 mg/L 富营养化磷标准近 5 倍,由此可见,即使完全控制外源的排入,由于底泥的释放,也可使玄武湖总磷浓度维持在一个较高的水平. 因此对玄武湖中磷的内源污染应予以高度重视,在治理外源性磷的同时,也要根治内源性磷的二次污染.

3 结论

通过以上分析可得出如下结论:①玄武湖表层底泥磷含量平面分布差异较大,垂向分布自 15 cm 处向表层,总磷含量增加趋势明显,但大于 15 cm 后,总磷含量维持在 0.055% 左右. ②通过静态条件下不同温度底泥释磷室内实验证实,体系温度升高,可使磷释放量增加,释放强度最大值出现时间均随温度的增加而提前,温度每升高 10℃,底泥释磷约增加一倍. ③底泥释磷速率与上覆水温度的关系:北湖为 $S_{ij} = 0.121 e^{0.127T}$ 、东南湖 2[#] 为 $S_{ij} = 0.128 e^{0.126T}$ 、3[#] 为 $S_{ij} = 0.115 e^{0.128T}$ 、西南湖为 $S_{ij} = 0.105 e^{0.131T}$. ④采用实验结果和间隙水扩散模型计算的玄武湖底泥磷年释放总量分别为 2.094 t 和 2.014 t. ⑤在不考虑外源污染的情况下,由底泥磷释放造成的内源污染使磷浓度年均维持在 0.101 mg/L,因此,在切断外源污染的情况下应采取治理内源污染.

致谢:中国科学院太湖湖泊生态系统研究站为本研究提供了所需场地和实验设备,在此表示感谢.

4 参考文献

[1] 尹大强,谭秋荣. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响. 湖泊科学,1994,6(3):240-245.
 [2] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学,2002,14(3):193-202.
 [3] 金相灿,刘鸿亮等. 中国湖泊富营养化. 北京:中国环境科学出版社,1992:163-216.
 [4] 魏复盛,寇洪茹,洪水皆等. 水和废水监测分析方法(第三版). 北京:中国环境科学出版社,1997:280-286.
 [5] 汪家权,孙亚敏,钱家忠等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究. 环境科学学报,2002,22(6):738-742.
 [6] 屠清瑛,顾丁锡,尹澄清等. 巢湖-富营养化研究. 合肥:中国科学技术大学出版社,1990:67-71.
 [7] 范成新. 漏湖沉积物理化特征及磷释放模拟. 湖泊科学,1995,7(4):341-350.
 [8] 范成新,张路,杨龙元等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟. 海洋与湖沼,2002,33(4):370-378.
 [9] 戴树桂,张明顺,庄源益等. 底泥中氮的主要迁移转化过程及其转化模型的研究. 环境科学学报,1990,10(1):1-9.